

## FTN 전송기법에서 최적의 필터 roll-off 값 및 탭수 설정

정지원\*

# Optimal Number of Filter Coefficient and Tabs for FTN Transmission Method

Ji-Won Jung\*

**요약** 본 논문은 인접 심볼 간의 간섭이 발생하지 않는 최대 데이터 전송률인 Nyquist rate 보다 빠르게 데이터를 전송하여 전송량을 증가시키는 FTN(Faster than Nyquist) 기법을 이용하여 최적의 필터 roll-off 값과 탭 수를 설정한다. FTN 신호 전송 시 발생하는 ISI(Inter-Symbol Interference)를 최소화하기 위해 LDPC부호를 기반으로 하는 터보 등화 모델을 적용하였으며, FTN 신호의 필터 roll-off 값과 탭 수에 따라 시뮬레이션하여 성능을 향상시키고 최적의 값을 설정하였다.

**Abstract** In this paper, to increase the throughput for wireless communication, FTN methods that is faster than Nyquist rate are used recently. To improve performance, turbo equalization algorithms that iteratively exchange probabilistic information between soft Viterbi equalizer and LDPC decoder to minimize ISI are applied in this paper. In FTN transmission, the performance depends on roll-off value and number of tabs of SRRC(Square Root Raised Cosine) filter. Therefore, Based on simulation, this paper present optimal number of filter coefficient and tab for various ISI factor of  $\tau$ .

**Key Words** : Filter tab, Coefficient, FTN, ISI, Turbo Equalization, LDPC

### 1. 서론

수중 통신 및 위성 통신을 하는데 있어 갈수록 높은 데이터 전송률이 요구되어지고 있다. 반면에 대역폭이 제한 되어 있기 때문에 한정된 대역폭에서 전송률 향상을 위한 많은 방안들이 연구되어지고 있다. 그러나 전송률과 성능은 절충 관계이기 때문에 전송률을 증가시키면서 성능이 최대한 유지가 되는 방식을 연구하는 것이 가장 중요하다. 기존의 통신 표준안 DVB-S2 (Digital Video Broadcasting Satellite Second Generation) 기반 위성통신에서는 복호 속도를 개선시켜 전송률을 향상시키는 방안이 있으나

이미 연구가 포화 상태에 이르렀다. 차세대 DVB-S3은 FTN (Faster Than Nyquist), 즉 Nyquist 전송률보다 더 빠르게 전송하는 방식이 대두되고 있다[1-3].

기존의 DVB-S2 표준안에서는 복호화 방식으로 LDPC(Low Density Parity Check) 부호화 방식을 적용하고 있으나[4] 이는 FTN 기법 적용으로 인해 생기는 ISI(Inter-Symbol Interference)를 해결하기 어려움이 있다. 따라서 차세대 위성 통신 DVB-S3에서는 FTN 적용을 위해서 비터비 등화기를 이용하여 LDOC 복호기와 연결한 터보 등화기법을 시도하고 있다[5]. 적용되는 비터비 등화기는 이미 널리 알려진 것과 같이 출력

\* Corresponding Author : Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime Ocean University, Busan, Korea  
Received april 3, 2015 Revised april 7, 2015 Accepted april 11, 2015

비트가 경관정된 비트가 출력되므로 이를 LDPC 복호기 입력으로 사용되면 성능저하를 초래한다.

본 논문에서는 부호 과정에서 convolutional 부호기의 SOVA( Soft Output Viterbi Algorithm)인 BCJR(Bahl, J.Cocke, F.Jelinek, and J.Raviv) 기법을 이용한다[6]. BCJR 기법의 비터비 등화기를 이용하여 LDPC 복호기와 연결한 터보 등화기법을 적용한다. LDPC와 비터비 등화기를 연결한 터보등화기법을 적용한 FTN 전송 신호는 필터의 roll-off 값과 tab수의 영향을 받게 된다. 따라서 본 논문에서는 FTN 신호에 적용되는 roll-off 값과 tab수를 변화시켜 가면서 FTN의 간섭량에 따라 최적의 값을 설정한다.

## 2. System Model

FTN 전송 방법은 주파수 대역에 의해 주어지는 Nyquist rate 보다 빠르게 신호를 전송하는 방법이다. 예를 들어 어느 정해진 시간동안 Nyquist rate 에 따라 전송하면 10000개의 데이터를 전송한다고 했을 때, FTN 방식을 사용하여 50%로 축소하면 동일한 시간동안 20000개의 데이터를 전송할 수 있다. 그로 인해 필연적으로 ISI가 발생하게 된다. 간섭된 신호의 형태는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$s(t) = \sqrt{E_s} \sum_n a_n h(t - n\tau T), \tau < 1 \quad (1)$$

$a_n$  은 전송되는 신호를 나타내며,  $h(t - n\tau T)$  는 필터응답을 나타내며,  $\tau$ 는 간섭되는 정도를 의미한다. 수신신호는 아래 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y(n\tau T) = \sum_k a_k p((n - k)\tau T) + n'(n\tau T) \quad (2)$$

$p((n - k)\tau T)$  는 ISI가 첨가된 수신신호에 대한 샘플값을 나타내며,  $n'(n\tau T)$ 는 가우시안 잡음의 샘플값을 나타낸다. 그리고 이의 간섭은 오류정정 부호화 방식을 적용하여 보상할 수 있다.

그림 1은 오버샘플링된 데이터와 Nyquist rate 에 따라 전송되는 데이터, 그리고 FTN 을 적용한 데이터를 나타낸다.

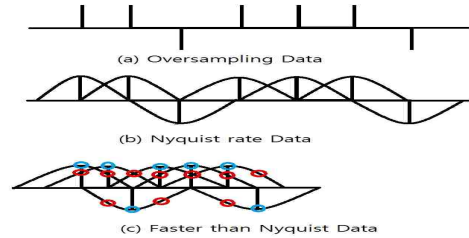
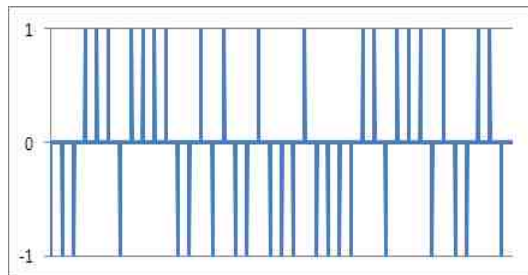


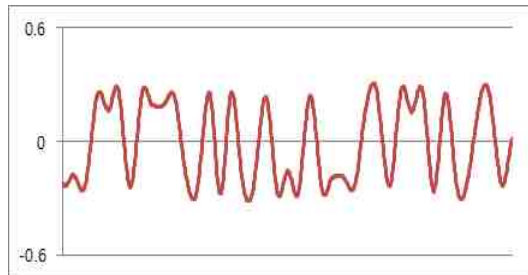
그림 1. (a) 오버샘플링된 데이터 (b) Nyquist rate로 필터링 된 신호, (c) FTN 모델링 신호

Fig. 1. (a) Oversampling data, (b) The filtered signal to the Nyquist rate, (c) FTN modeling signal

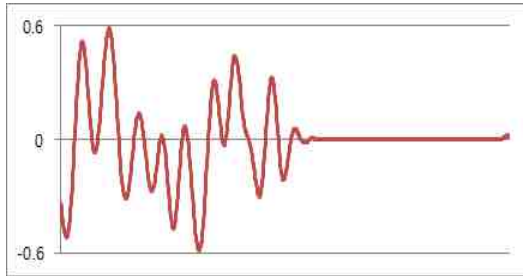
그림 1-(b) 를 보면 Nyquist rate 에 따라 전송되면 ISI가 생기지 않는 것을 알 수 있다. 하지만 그림 1-(c) 에서는 FTN 으로 인해 인접 심볼들이 서로 영향을 주어 데이터의 Decision 시점 마다 그림 1-(c)의 원으로 표시된 부분이 원 데이터에 첨가 되게 되어 데이터에 영향을 준다. 그림2 는 이와 같은 간섭으로 인한 파형의 변화를 나타낸다.



(a) Oversampling Data



(b) Nyquist rate Data



(c) Faster than Nyquist Data(50%)

그림 2. (a) 오버샘플링된 데이터 (b) Nyquist rate로 필터링 된 신호 파형, (c) FTN 모델링 신호파형  
 Fig. 2. (a) Oversampling data, (b) Waveform of filtered signal to the Nyquist rate, (c) Waveform of FTN modeling signal

그림 2에서 알 수 있듯이 그림 2-(a)와 같은 오버샘플링된 데이터를 Nyquist rate 에 따라 전송하면 그림 2-(b)와 같이 파형이 형성되지만 FTN을 적용하면 그림 2-(c)처럼 ISI로 인해 신호의 파형이 왜곡 되지만 이를 해결할 수 있다면 동일한 시간에 두 배의 데이터를 전송할 수 있음을 알 수 있다. ISI로 인한 왜곡된 신호를 복호 할 수 있는 효율적인 복호 모델은 3장에서 제시한다.

### 3. 터보 등화기를 이용한 FTN 복호기

기존의 DVB-S2 에서는 복호 방식을 LDPC 부호화 방식을 적용하고 있으나 2장에서 설명한 FTN 기법 적용으로 인한 ISI를 해결하기 어려움이 있다. 따라서 차세대 DVB-S3에서는 FTN 적용으로 인한 위해서 비터비 등화기를 이용하여 LDPC 복호기와 연결한 터보 등화 기법을 시도하고 있다. 적용되는 비터비 등화기는 이미 널리 알려진 것과 같이 출력 비트가 경관정된 비트가 출력되므로 이를 LDPC 복호기 입력으로 사용되면 성능 저하를 초래한다. 따라서 본 논문에서는 BCJR 기법을 이용하여 비터비 등화기를 구성하였으며, 비터비 등화기의 출력값인 연관정값을 LDPC 복호기에 입력하여 반복구조로 구성

한 터보 등화 기법을 적용하였으며, 이의 구조는 그림 3과 같다.

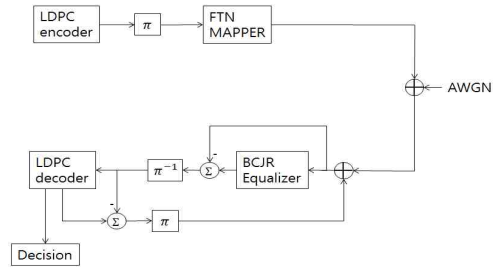


그림 3. BCJR 기법을 이용한 비터비 등화기와 터보 등화 기법을 포함한 부복호기 구조

Fig. 3. Structure of encoder and decoder included Viterbi Equalizer based on BCJR method and Turbo Equalization

그림 3의 블록도에서 LDPC 부호화기로 데이터를 부호화시키고 인터리버를 통과한 뒤 FTN mapper 를 이용해  $\tau$ 만큼 간섭량 발생하여 AWGN(Additive White Gaussian noise) 잡음 채널을 통과한다.  $\tau$ 만큼 간섭량의 의미는  $\tau$ 만큼 전송률이 증가됨을 의미한다. 그리고 BCJR 기법을 이용한 비터비 등화기를 이용하여 FTN으로 의한 ISI를 보상해준 다음 디인 터리빙하고 LDPC 복호기를 이용해 복호한다. 그리고 반복을 통하여 성능을 향상시킨다. FTN mapper 는 송신하려는 데이터를  $\tau$ 만큼 FTN에 의한 ISI를 첨가 시키는 부분을 의미한다.

AWGN 통과 전의 FTN에 의한 ISI만을 포함하는 데이터는 수신 측에서 예측이 가능하다. 그 이유는  $\tau$ 에 따라 ISI로 인해 어느 정도 값을 가지게 되는지 알 수 있기 때문이다. BCJR 기법을 이용한 비터비 등화기는 데이터를 이용해 BM(Branch Metric), BSM(Backward State Metric), FSM (Forward State Metric), LLR(Log Likelihood Ratio)을 구하여 ISI를 보상한다.

#### 4. 최적의 roll-off 값 및 탭 수 설정

시뮬레이션은 일반적인 AWGN 채널만이 존재할 때의 환경을 고려하였다.

3장에 대한 시뮬레이션 결과에 앞서 2장에서 설명하였던 FTN 신호를 AWGN 채널을 통과시킨 뒤 비터비 등화기 없이 오로지 LDPC 복호기만을 이용하여 복호하였을 때의 시뮬레이션 결과는 다음 그림 4와 같다.

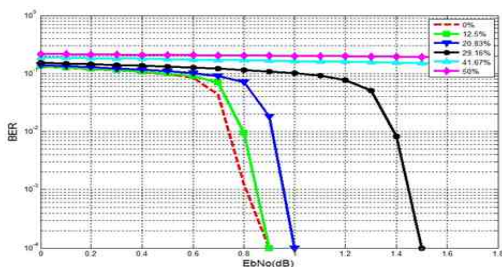
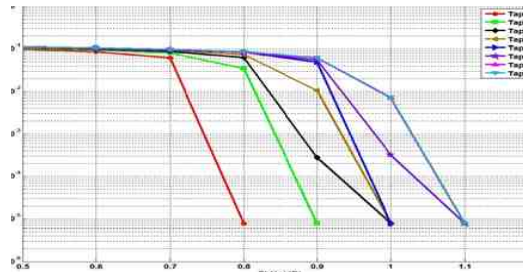


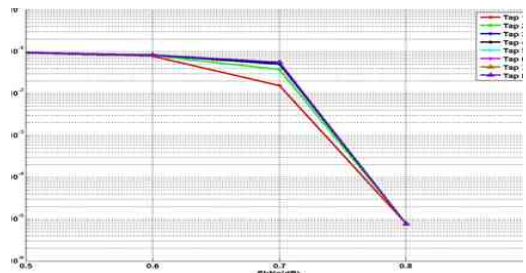
그림 4.  $\tau$ 에 따른 LDPC 성능

Fig. 4. Performance of LDPC decoder according to  $\tau$

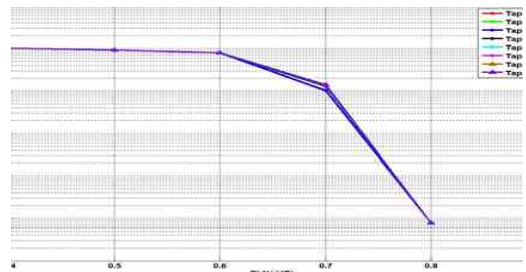
필터는 roll-off factor가 0.35, 샘플링 간격이 24, 필터 탭이 1인 SRRC필터를 사용했다. 그림 6을 보면 10% 일 때 0%와 성능이 거의 비슷하며, 20% 정도의 FTN은 성능은 0.1dB정도로 성능 차이가 크게 나지 않지만 그 이상을 사용하면 성능이 악화되다가 약 40%이상으로 축소하게 되며 과도한 ISI로 인해 EbNo가 커져도 복호하지 못하는 것을 알 수 있다. 즉, ISI가 성능에 영향을 주므로 이를 보상하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 필터의 탭수와 필터 계수를 정하는 roll-off factor에 따른 성능 변화를 비교 분석하여 최적의 성능을 분석하고자 한다. 필터의 탭수는 1개부터 8개까지 변화시켰고, roll-off factor는 0.1, 0.2, 0.35에 대해 성능을 분석했다. FTN 관점에서 보기 위해  $\tau$ 의 변화에 관해서도 분석한다



(a) Roll-off factor = 0.1



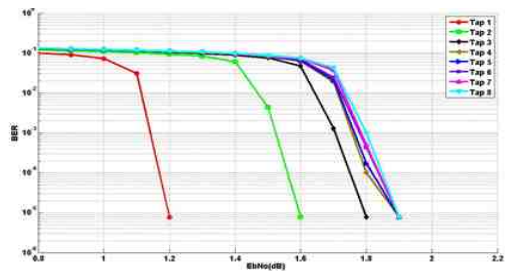
(b) Roll-off factor = 0.2



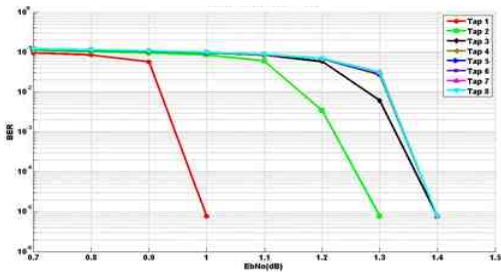
(c) Roll-off factor = 0.35

그림 5 필터 탭과 계수에 대한 성능 ( $\tau = 10\%$ )

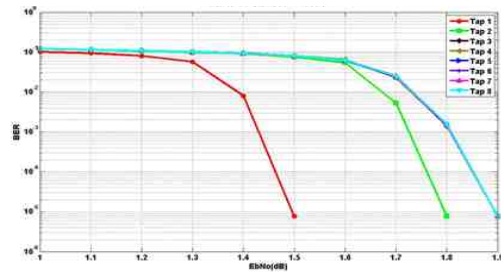
Fig 5 The performance for filter tap and coefficients ( $\tau = 10\%$ )



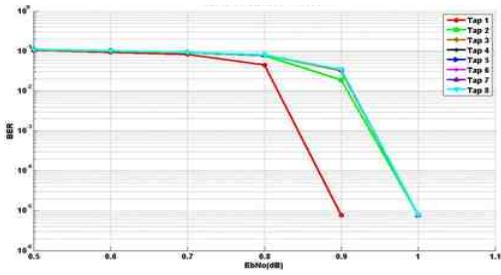
(a) Roll-off factor = 0.1



(b) Roll-off factor = 0.2



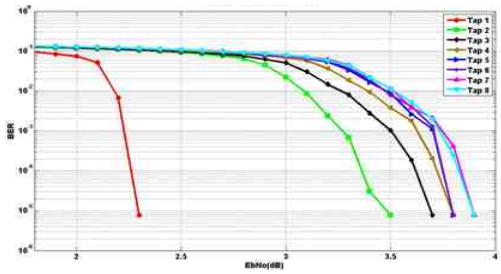
(c) Roll-off factor = 0.35



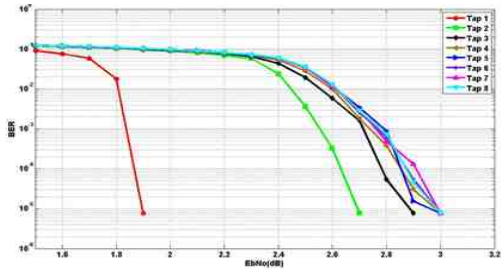
(c) Roll-off factor = 0.35

그림 6 필터 탭과 계수에 대한 성능 ( $\tau = 20\%$ )

Fig 6 The performance for filter tap and coefficients ( $\tau = 20\%$ )



(a) Roll-off factor = 0.1



(b) Roll-off factor = 0.2

그림 7 필터 탭과 계수에 대한 성능 ( $\tau = 30\%$ )

Fig. 7 The performance for filter tap and coefficients ( $\tau = 30\%$ )

그림 5~7는  $\tau$  를 10%, 20%, 30% 로 하고, 필터의 탭 수 및 roll-off factor에 따른 성능을 나타내고 있다.  $\tau$ 는 Fig 4에서 그 이상의 값으로 했을 때 복호를 하지 못했으므로 30%까지만 고려한다. 그림 5에서 알 수 있듯이 각각 탭이 증가 할수록 성능 열화가 발생하며, roll-off factor가 증가 할수록 성능은 탭수의 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 그림 6, 그림 7 는  $\tau$ 가 20%와 30%에서의 성능을 나타내며, 그림 5과 비슷한 결과를 나타낸다. 즉, 어떤  $\tau$  값에서든 roll-off factor가 작을수록, 탭이 증가할수록 ISI가 증가하기 때문에 성능열화가 발생하고  $\tau$ 가 증가할수록 그 차이가 커지는 것을 알 수 있다.

그림 5~7을 종합적으로 분석하였을 때 알 수 있는 것은  $\tau$ 가 작을 때는 탭 수의 영향을 받지 않으나  $\tau$ 가 클 때에는 탭 수의 영향을 받음을 알 수 있다. 이를 고려하여  $\tau$ 와 roll-off factor에 따른 시뮬레이션 시 고려되어야 할 최적의 탭 수를 표 1에 나타내었다.

표 1. roll-off factor 와  $\tau$  에 따른 최적의 탭 수  
Table 1. Optimal tap size according to  $\tau$  and roll-off factor

$\tau$	Roll-off factor	Optimal tap 수
10%	0.1	6
	0.2	1
	0.35	1
20%	0.1	4
	0.2	3
	0.35	2
30%	0.1	3
	0.2	3
	0.35	3

### 5. 결론

본 논문에서는 FTN 전송기법을 위한 효율적인 알고리즘과 FTN 신호 처리 기법에서 고전송률을 위한 최적의 필터 탭수와 필터 계수를 제안하였다. FTN 기법으로 인한 ISI를 제거하기 위한 BCJR 알고리즘 기반의 비터비 등화기를 이용, LDPC 복호기와 연결한 터보 등화 기법을 적용하였다

먼저 FTN 전송 기법을 적용할 때, 사용한 필터의 계수가 0.35, 샘플링 간격이 24인 SRRC필터를 사용했다.  $\tau$ 에 따른 성능 분석을 토대로 30% 이하의 각각의  $\tau$  를 기준으로 roll-off factor 와 필터 탭수에 따른 성능 분석을 한 결과, 탭이 증가할수록 성능 열화가 발생하며, 필터계수가 작을수록 탭 수가 성능에 영향을 미치는 것을 알 수 있고 필터계수가 증가 할수록 성능은 탭 수의 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

### REFERENCES

[1] J. E. Mazo, "Faster-than-Nyquist signaling." Bell Syst. Tech. J., vol. 54, no. 8, pp. 1451-1462, Oct. 1975.  
[2] A. D. Liveris and C. N. Georgiades, "Exploiting faster-than-Nyquist signaling." IEEE

Trans. Commun., vol. 51, no. 9, pp. 1502-1511, Sep. 2003.

[3] F. Rusek and J. B. Anderson, "Multistream Faster than Nyquist Signaling." IEEE Trans. Commun., vol. 57, no. 5, pp. 1329-1340, May 2009.  
[4] Gun Yeol Park, Seong Ro Lee, Sung Min Jeon, Ji-Won Jung, "Design of High Speed LDPC Encoder Based on DVB-S2 Standard.", KICS, vol 38C, no. 2, pp. 196-201, Feb. 2013.  
[5] C. Douillard, et al., "Iterative correction of intersymbol interference: Turbo equalization." Eur. Trans. Telecommun., vol. 6, no. 5, pp. 507-511, Sep.-Oct. 1995.  
[6] Bahl L, Cocke J, Jelinek F, and Raviv J, "Optimal Decoding of Linear Codes for minimizing symbol error rate", IEEE Transactions on Information Theory, vol. IT-20, no.2, pp.284, 1974.

### 저자약력

#### 정 지 원(Ji-won Jung)

#### 정희원



- 1989년 2월: 성균관대학교 전자공학과 (공학사)
  - 1991년 2월: 성균관대학교 전자공학과 (공학석사)
  - 1995년 2월: 성균관대학교 전자공학과 (공학박사)
  - 1991년 1월~1992년 2월: LG 정보통신연구소 연구원
  - 1995년 9월~1996년 8월: 한국통신위성통신연구실 선임연구원
  - 1997년 3월~1998년 12월: 한국전 자통신연구원 초빙 연구원
  - 1996년 9월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 교수
  - 2001년 8월~2002년 8월: 캐나다 NSERC Fellowship(Communication Research Center 근무)
- 위성통신, 이동통신, 수중통신, 변,복조기술, 채널코딩, FPGA 기술 등

<관심분야>